

سطح آستانه بهینه جهت شناسایی ستاره‌ها در ردیاب ستاره

حمید امین الرعایا^۱، محمد مهدی نژاد نوری^۲، علی جبار رشیدی^۳

۱دانشجو دکترای مخابرات سیستم، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، h.aminoroaya@yahoo.com

۲دانشیار الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳دانشیار مخابرات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۴/۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۰

چکیده

در این مقاله مدل دقیقی از بخش الکترواپتیکی سامانه ردیاب ستاره و نحوه تشکیل تصویر ستاره ارائه شده است. سپس از این مدل برای تشخیص ستاره‌ها از نوفه با معرفی شیوه خاص در تعیین مقدار آستانه، در تصویر گرفته شده توسط ردیاب ستاره استفاده گردیده است. با بهره‌گیری از نظریه آشکارسازی اثبات شده که روش سطح آستانه، آشکارساز بهینه ستاره‌ها در تصویر می‌باشد و نحوه تعیین مقدار سطح آستانه بهینه با توجه به مشخصات ردیاب ستاره بدست آمده است. همچنین نشان داده شده که اثر محل قرارگیری تصویر ستاره نسبت به مکان پیکسل‌های حسگر تصویربرداری تا چه میزان بر روشنایی تصویر ستاره و در نتیجه سطح آستانه‌ی بهینه مؤثر است. این متغیر در مقالات به صورت دقیق بررسی نشده است و عدم در نظر گرفتن این مسئله سبب انتخاب سطح آستانه نادرست خواهد شد. مقدار سطح آستانه اهمیت بسیار زیادی دارد چون از یک سو با افزایش سطح آستانه، ستاره‌ها از دست خواهند رفت و از سوی دیگر با کاهش آن، نوفه‌ها به عنوان ستاره تشخیص داده می‌شوند که این امر سبب افزایش زمان محاسبات و یا عدم امکان تعیین وضعیت می‌گردد.

کلیدواژه

ردیاب ستاره، آشکارسازی ستاره، سطح آستانه، نوفه‌های حسگر تصویربرداری، نظریه آشکارسازی

مقدمه

معینی بیشتر گردد به عنوان پیکسلی از تصویر ستاره و اگر کوچکتر باشد، نوفه در نظر گرفته می‌شود. اینکه مقدار سطح آستانه چه میزانی انتخاب شود از اهمیت بالایی برخوردار است. زیرا ممکن است برخی از ستاره‌ها تشخیص داده نشوند و یا نوفه‌ها به عنوان ستاره انتخاب گردند که مشکلات زیادی را در تعیین وضعیت بوجود می‌آورد [۳].

مقدار سطح آستانه وابستگی مستقیم به طراحی الکترواپتیکی سامانه دارد ولی مقالات اندکی وجود دارد که به بیان این رابطه و نحوه تعیین سطح آستانه با استفاده از مشخصات سیستم پرداخته‌اند. با این حال در مقالات موجود، میزان سطح آستانه به روش‌های گوناگونی انتخاب شده است. در [۴] میزان سطح آستانه را کسری از حداکثر مقدار یک پیکسل^۴ در نظر گرفته است. به عنوان مثال برای یک حسگر تصویربرداری که خروجی آن ۱۶ بیتی است، سطح آستانه را شش درصد حداکثر مقدار یعنی حدود ۴۰۰۰ در نظر می‌گیرد. در [۵] نیز که خروجی ۱۲ بیتی و حداکثر

امروزه ردیاب ستاره به عنوان یکی از حسگرهای اصلی جهت تعیین وضعیت در ماهواره‌ها استفاده می‌شود که ستاره‌ها را به عنوان مرجع خود در نظر می‌گیرد و دقت بالایی دارد. روش تعیین وضعیت این حسگر بدین گونه است که ابتدا تصویری از آسمان گرفته می‌شود و با پردازش‌های لازم، ستاره‌ها از نوفه متمایز می‌گردند و مکان دقیق‌شان در تصویر بدست می‌آید. سپس با پایگاه داده‌ای که در اختیار دارد مقایسه می‌کند و وضعیت ماهواره را بدست می‌آورد. در چند دهه اخیر روش‌های شناسایی ستاره^۲ مختلفی معرفی شده‌اند [۱] [۲] که در آن‌ها تشخیص پیکسل‌های مربوط به ستاره^۲ معمولاً توسط روش سطح آستانه صورت گرفته است. این روش از لحاظ محاسباتی بهینه است و پیاده‌سازی ساده‌ای دارد بدین صورت که اگر روشنایی پیکسل از سطح آستانه

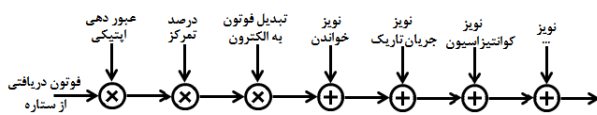
- 1 Noise
- 2 Star Identification
- 3 Star Detection

4 Dynamic Range

الگوی روشنایی ستاره در تصویر

در این بخش الگوی میزان روشنایی پیکسل مربوط به ستاره در تصویر گرفته شده توسط ردیاب ستاره نوعی، طبق مدل ارائه شده در شکل ۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس اثر هر یک از بخش‌ها بر روی ولتاژ تولید شده در پیکسلی که بیشترین مقدار را از تصویر ستاره دارد و همچنین تابع توزیع احتمال آن‌ها بررسی می‌شود. در نهایت در این مقاله با ترکیب توزیع احتمال متغیرهای مؤثر، تابع توزیع کلی سامانه برای پیکسل مرکزی بدست می‌آید.

در واقع ستاره‌ها بر اساس اندازه‌ای که دارند، شار فوتون مشخصی را از خود منتشر می‌کنند. بخش اپتیکی ردیاب ستاره، میزان درصد معینی از این فوتون‌ها را از خود عبور داده و به حسگر تصویربرداری می‌رساند. بدلیل دِفوکاس بودن، این تعداد فوتون به چند پیکسل می‌رسد که در هر پیکسل این فوتون‌ها تبدیل به الکترون می‌گردد. در پایان نوبه‌های مختلفی از جمله نوبه جریان تاریک و نوبه خواندن به آن اضافه می‌گردد. در ادامه هر یک از این مراحل به تفصیل توضیح داده می‌شود [۱۰][۱۱][۱۲].



شکل ۱. الگوی شناسایی ستاره

فوتون دریافتی

ستاره‌ها با توجه به شدت روشنایی خود، شار فوتون متفاوتی دارند. به گونه‌ای که ثابت می‌شود تعداد فوتون دریافتی از یک ستاره، در واحد سطح و واحد زمان به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۱۳]:

$$B = 4 \times 10^6 \times 10^{-\frac{m_p}{2.5}} \text{ photon/cm}^2/\text{sec} \quad (1)$$

که در آن m_p قدر ستاره می‌باشد. با مشخص بودن قطر دهانه ردیاب ستاره و همچنین زمان نورگیری، تعداد کل فوتون دریافتی از ستاره در هر بار نورگیری به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{total - photon} = B \times t_{int} \times A \quad (2)$$

که t_{int} زمان نورگیری بر حسب ثانیه و A سطح دریچه ردیاب ستاره بر حسب سانتی‌مترمربع می‌باشد. ولی تعداد فوتون رسیده از یک ستاره، تعداد ثابتی نیست و حالت تصادفی دارد؛ به گونه‌ای که در زمان‌های مختلف تعداد آن متغیر است^۹. با توجه به آنکه تعداد فوتون دریافتی یک عدد صحیح است، اثبات شده است که توزیع احتمال آن پواسون و چگالی احتمال آن برابر با رابطه زیر می‌باشد [۱۰].

مقدار آن ۴۰۹۵ بوده است، سطح آستانه را حدود سه درصد و برابر با ۱۲۰ می‌گیرد. که این مقادیر کاملاً به طراحی ردیاب ستاره بستگی دارد و به آن نمونه خاص منحصر است.

در برخی مقالات بیان شده است که تعیین میزان سطح آستانه از طریق سعی و خطا و تجربی صورت می‌گیرد [۶]. ولی این روش بستگی زیادی به شرایط آزمایش از جمله منطقه‌ی عکسبرداری از آسمان، اثر اتمسفر و قدر ستارگان دارد. در برخی دیگر از مقالات کمی دقیق‌تر به مسأله توجه می‌شود و مقدار سطح آستانه را از تصویر گرفته شده بدست می‌آورند. بدین صورت که میانگین و انحراف معیار تصویر را بدست می‌آورند و سطح آستانه را برابر با میانگین باضافه سه برابر انحراف معیار قرار می‌دهند [۷][۸]. این روش ممکن است در برخی از شرایط درست باشد؛ زیرا در این مقدار از سطح آستانه، اثر نوبه بسیار کم خواهد بود ولی در حالت کلی بهینه نیست و لازم است که مقدار مناسب بدست آید. در [۳] مسأله مکان قرارگیری ستاره در صفحه کانونی نیز مورد توجه قرار گرفته است. بدین صورت که انحراف معیار^۵ تصویر بر میزان حداکثر درصدی از نور ستاره که در یک پیکسل قرار می‌گیرد تقسیم شده و سپس سطح آستانه بدست آمده است. با این وجود سطح آستانه بدست آمده در حالت کلی و مخصوصاً در شرایطی که نسبت سیگنال به نوبه (SNR^6) پایین است کارایی ندارد. به عنوان نمونه در طراحی ردیاب ستاره‌هایی که در ماهواره‌های کوچک^۷ مورد استفاده قرار می‌گیرند، محدودیت‌های زیادی از جمله وزن و ابعاد وجود دارد که منجر به کاهش نسبت سیگنال به نوبه خواهد شد. بنابراین به منظور تعیین سطح آستانه، لازم است مشخصات سامانه و همچنین طراحی الکترواپتیکی آن در نظر گرفته شود. در [۹] نیز مبحث مکان قرارگیری ستاره نسبت به یک پیکسل مورد بررسی قرار گرفته است ولی در روابط، اثر آن را عددی ثابت فرض کرده است.

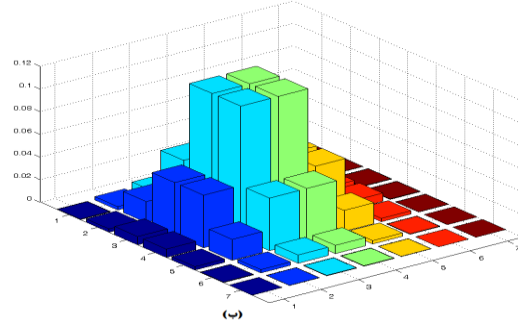
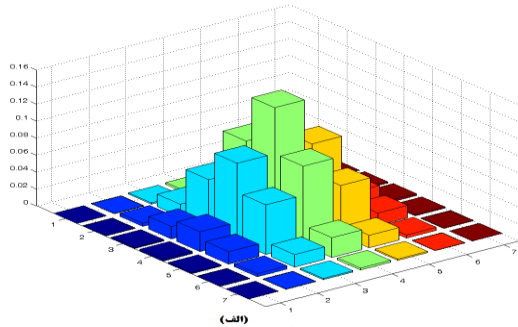
در این مقاله مدلی از بخش الکترواپتیکی ردیاب ستاره معرفی می‌شود و رابطه بین میزان روشنایی پیکسل‌های مربوط به تصویر ستاره، با مشخصات ردیاب ستاره (شامل قدر^۸ ستاره دیده شده، متغیرهای اپتیکی، محل قرارگیری ستاره نسبت به پیکسل‌های حسگر و مشخصات حسگر تصویربرداری) معین می‌گردد. سپس با استفاده از نظریه آشکارسازی، سطح آستانه بهینه معرفی می‌شود. در واقع هر طراح ردیاب ستاره باید این محاسبات را انجام دهد تا میزان سطح آستانه را به ازای کم‌نورترین ستاره قابل رؤیت بدست آورد و یا به عبارت دیگر مشخص نماید که در سامانه طراحی شده حداکثر چه قدری از ستاره‌ها قابل رؤیت هستند.

- 5 Standard Deviation
- 6 Signal to Noise Ratio
- 7 Micro Satellite
- 8 Magnitude

۹ تغییرات در تعداد فوتون دریافتی را Photon Shot Noise نیز می‌گویند.

$$\int_0^1 \int_0^1 \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}} dx \cdot dy \quad (6)$$

که x_0 و y_0 متغیرهای تصادفی یکنواخت بین صفر و یک هستند و مقدارشان به مکان قرارگیری مرکز ستاره بستگی دارد. اگر مرکز تصویر ستاره، منطبق بر مرکز پیکسل باشد ($x_0=0/5$ و $y_0=0/5$) بیشترین فوتون بر روی پیکسل مرکزی می‌افتد. ولی اگر مرکز تصویر ستاره در مرز بین چهار پیکسل مجاور هم قرار گیرد ($x_0=0$ و $y_0=0$) کمترین فوتون به پیکسل مرکزی می‌رسد.



شکل ۲. نسبتی از فوتون‌ها که بر روی هر پیکسل قرار می‌گیرد ($\sigma=1$)
الف) $x_0=0/5$ و $y_0=0/5$ ب) $x_0=0$ و $y_0=0$

همانگونه که در شکل فوق نشان داده شده است نسبت فوتون جمع شده در پیکسل مرکزی در حالات مختلف تفاوت زیادی دارد. با این وجود در مقالات این متغیر را عددی ثابت فرض کرده‌اند و یا اثر آن را اصلاً در نظر نمی‌گیرند. ولی این متغیر خاصیت تصادفی دارد و نقش مهمی را در تعیین مقدار آستانه دارا می‌باشد که مقدار آن برابر با رابطه (۶) است. در این مقاله تابع توزیع احتمال آن به صورت زیر تعریف و به عنوان متغیر مؤثر در مقدار پیکسل مرکزی به کار گرفته شده است که تفاوت اصلی الگوی آرایه شده (شکل ۱) با کارهای گذشته است.

احتمال قرارگیری مرکز تصویر ستاره در قسمت‌های مختلف پیکسل یکسان است به همین دلیل x_0 و y_0 دارای توزیع یکنواخت هستند و مقادیرشان بین صفر و یک است.

$$P_{x_0}(x_0) = \begin{cases} 1 & 0 < x_0 < 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{y_0}(y_0) = \begin{cases} 1 & 0 < y_0 < 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

$$P(x) = \frac{e^{-\bar{x}} \cdot \bar{x}^x}{x!} \quad (3)$$

که \bar{x} میانگین متغیر تصادفی (تعداد فوتون دریافتی) است. اثبات می‌شود برای حالتی که میانگین توزیع پواسون نسبتاً زیاد باشد، توزیع احتمال آن با تقریب خوبی به توزیع گوسی با میانگین \bar{x} و واریانس $\sqrt{\bar{x}}$ میل خواهد کرد. بنابراین تابع توزیع احتمال فوتون دریافتی از ستاره به صورت زیر است:

$$P_U(u) \sim N(\bar{x}, \sqrt{\bar{x}}) = N(m_u, \sigma_u) \quad (4)$$

$$m_u = 4 \times 10^6 \times 10^{-\frac{m_v}{2.5}} \times t_{int} \times A$$

$$\sigma_u = \sqrt{m_u}$$

عبوردهی اپتیکی

سامانه اپتیکی اجازه عبور به همه فوتون‌ها را نمی‌دهد و معمولاً حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد آن‌ها قادر به عبور از آن و رسیدن به حسگر تصویربرداری هستند. این درصد مقدار معینی است و به طراحی اپتیک ردیاب ستاره، جنس لنزهای آن، لایه نشانی لنزها و ... بستگی دارد. ($0.6 < k < 0.8$)

نسبت فوتون جمع شده در پیکسل مرکزی

یکی از راه‌های افزایش دقت ردیاب ستاره، دِفوکاس کردن سامانه اپتیکی است. این امر سبب می‌شود که در الگوریتم‌های پردازش تصویر، دقت محاسبه مرکز ستاره در تصویر افزایش یابد. با این عمل، تصویر ستاره بر روی چند پیکسل می‌افتد و در نتیجه مرکز ستاره با استفاده از الگوریتم مرکز جرم‌یابی، با دقت زیرپیکسل محاسبه می‌شود.

بنابراین فوتون‌هایی که در قسمت قبل اشاره شد بر روی چند پیکسل از حسگر تصویربرداری خواهد افتاد. اگر فرض شود تابع پراکندگی نقطه‌ای (PSF^{11}) سامانه اپتیکی متقارن باشد و همچنین فاصله‌ای بین پیکسل‌های حسگر تصویربرداری نباشد^{۱۱}، توزیع مکانی فوتون‌ها به صورت تابع طبیعی^{۱۲} متقارن دُو بُعدی خواهد بود.

$$PSF = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

که σ برابر با انحراف معیار تابع طبیعی است و به میزان دِفوکاس بودن سامانه اپتیکی بستگی دارد.

نسبت تعداد فوتونی که بر روی پیکسل با بیشترین مقدار (پیکسل مرکزی) قرار می‌گیرد به تعداد کل فوتون‌های دریافتی، برابر با انتگرال تابع توزیع در محدوده پیکسل مرکزی است.

10 Point Spread Function

11 Fill factor of the image sensor is $\underline{1}$.

12 Normal Function

نوفه جریان تاریک

نوفه جریان تاریک^{۱۵} ناشی از الکترون‌های منتشر شده بوسیله حرارت است و حتی هنگامی که نوری به حسگر تصویربرداری نتابد وجود دارد. مقدار این نوفه به ساختار حسگر و دمایی که در آن کار می‌کند بستگی دارد و با خنک نمودن آن می‌توان این نوفه را کاهش داد. این نوفه یک فرآیند پواسون است که برای پیکسل‌های مختلف متفاوت است و انحراف معیار آن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\sigma_{Dark} = \sqrt{d \cdot t_{int}} \quad (10)$$

که d نرخ جریان تاریک و t زمان نورگیری است. بنابراین هرچه زمان نورگیری بیشتر باشد، اثر این نوفه افزایش پیدا می‌کند.

نوفه چندی‌سازی

حسگر تصویربرداری به نوعی فوتون‌ها را دریافت و به الکترون تبدیل می‌نماید و سپس تعداد الکترون تولیدی را چندی^{۱۶} و در خروجی قرار می‌دهد. بدین صورت که خروجی دیجیتال هر یک از پیکسل‌ها، به ازای تولید چندین الکترون (که با بهره حسگر متناسب است)، یک واحد افزایش می‌یابد. به عنوان مثال اگر حسگر تصویر برداری ۱۰ بیتی باشد یعنی بیشترین مقدار خروجی یک پیکسل برابر با ۱۰۲۳ است و اگر از سوی دیگر هر پیکسل به ازای تولید ۱۵۰۰۰۰ الکترون اشباع گردد؛ میزان بهره آن برابر است با:

$$\Delta = \frac{150,000}{1024} \cong 146 \quad (11)$$

به عبارت دیگر به ازای تولید هر ۱۴۶ الکترون، خروجی یک واحد افزایش می‌یابد. بنابراین اگر از صفر تا ۷۳ الکترون تولید شود، خروجی برابر با صفر و از ۷۴ تا ۲۱۹ الکترون، معادل با ۱۴۶ الکترون است که خروجی برابر با یک خواهد بود.

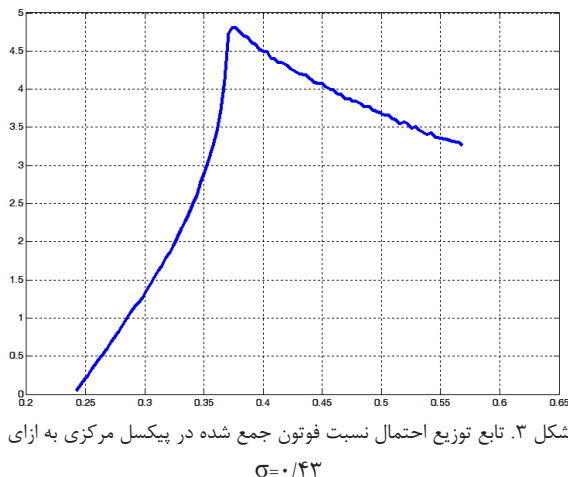
در واقع نوفه چندی‌سازی از همین عدم قطعیت در تعداد الکترون نشأت می‌گیرد که توزیع احتمال آن دارای میانگین صفر و انحراف معیار $\frac{\Delta}{\sqrt{12}}$ است.

نوفه خواندن

تبدیل غیردقیق الکترون‌ها از سیگنال وارد شده بر حسگر تصویربرداری و خواندن آن، همراه با نوفه است. این مسأله عمدتاً از تقویت کننده داخلی حسگر نشأت می‌گیرد که الکترون‌ها را به ولتاژ پیوسته^{۱۷} تبدیل می‌کند. انحراف معیار این نوفه به صورت زیر است.

$$\sigma_{readout} = \frac{R}{\Delta} \quad (12)$$

طبق مقاله [۳] مقدار بهینه برای انحراف معیار تابع توزیع مکانی فوتون‌ها بر روی پیکسل‌ها برابر با $0.43/\sigma$ است. بدان دلیل که به ازای این انحراف معیار و مقادیر مختلف الکترون تولید شده، حداقل مقدار خطای مرکز جرم‌یابی را دارا خواهد بود. با توجه به پیچیده بودن محاسبه تابع توزیع احتمال نسبت فوتون جمع شده در پیکسل مرکزی، در ادامه فرض بر آن خواهد بود که میزان دِفوکاس سامانه مورد بررسی نیز به همین اندازه است. در شکل زیر این تابع توزیع احتمال برای $(\sigma=0.43)$ رسم شده است. طبق این تابع توزیع، حداقل ۲۴ درصد و حداکثر ۵۷ درصد تعداد فوتون‌های رسیده به حسگر در پیکسل مرکزی قرار می‌گیرد و احتمال آنکه حدود ۳۸ درصد فوتون‌ها به پیکسل مرکزی برسد از بقیه بیشتر است. میانگین (امید ریاضی) این توزیع احتمال $0.43/\sigma$ و انحراف معیار آن $0.076/\sigma$ می‌باشد.



ضریب تبدیل فوتون به الکترون

پس از آنکه تعداد فوتون‌های رسیده به هر پیکسل مشخص گردید، در هر یک از پیکسل‌های حسگر تصویر بردار این فوتون‌ها به الکترون تبدیل می‌شود. ضریب تبدیل فوتون به الکترون تحت عنوان ضریب کارایی^{۱۳} شناخته می‌شود که جزو مشخصات حسگر است. البته این ضریب ممکن است برای پیکسل‌های مختلف، متفاوت باشد که به آن نوفه نایکنواختی^{۱۴} گویند. در حالت کلی می‌توان ضریب کارایی را با یک متغیر تصادفی طبیعی شبیه کرد که با ضرب در تعداد فوتون‌های رسیده به یک پیکسل، الکترون تولید شده توسط آن بدست می‌آید.

$$P_W(w) \sim N(m_w, \sigma_w) \quad (9)$$

15 Dark current noise

16 Quantize

17 Analog

13 Quantum Efficiency

14 Non-uniformity noise

$$\begin{aligned} H_0 : X &= Z \\ H_1 : X &= S + Z \end{aligned} \quad (16)$$

که Z نوفه گوسی با میانگین m_z و انحراف معیار σ_z است و مجموع آن با S نیز دارای میانگین m_s و انحراف معیار σ_s می باشد. در این مسأله قصد بر این است که با انتخاب آشکارساز مناسب و مقایسه آن با مقدار پیکسل (X) مشخص گردد که آیا این پیکسل متعلق به تصویر ستاره است (وقوع رخداد H_1) یا آنکه ناشی از نوفه می باشد (وقوع رخداد H_0).

احتمال اینکه واقعاً ستاره ای بوده است (H_1) و مقدار پیکسل (X) نیز بیشتر از سطح آستانه باشد، احتمال شناسایی (P_D) و احتمال آنکه واقعاً ستاره ای نباشد (H_0) ولی به اشتباه مقدار پیکسل (X) بیشتر از سطح آستانه شده باشد و ستاره تشخیص داده شود، احتمال هشدار اشتباه^{۲۳} (P_{FA}) نامیده می شود.

قضیه نیم-پیرسون^{۲۴} بیان می کند که برای افزایش P_D به ازای P_{FA} برابر با ρ ، تصمیم گرفته می شود که پیکسل متعلق به تصویر ستاره است (رخداد H_1 انتخاب می شود) اگر

$$L(x) = \frac{P(x|H_1)}{P(x|H_0)} > \gamma \quad (17)$$

به عبارت دیگر اگر $L(x)$ بزرگتر از γ باشد رخداد H_1 و اگر کوچکتر از آن باشد H_0 اتفاق افتاده است که مقدار γ طبق رابطه زیر بدست می آید.

$$P_{FA} = \int_{(x: L(x) > \gamma)} P(x|H_0) dx = \rho \quad (18)$$

اگر مقدار X به ازای فرضیه H_1 به صورت گوسی باشد (صحت این فرض در بخش شبیه سازی نشان داده خواهد شد):

$$L(x) = \frac{P(x|H_1)}{P(x|H_0)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} e^{-\frac{(x-m_s)^2}{2\sigma_s^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} e^{-\frac{(x-m_z)^2}{2\sigma_z^2}}} =$$

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_s} \exp\left(\frac{(x-m_z)^2}{2\sigma_z^2} - \frac{(x-m_s)^2}{2\sigma_s^2}\right) =$$

$$\frac{\sigma_z}{\sigma_s} \exp\left(\frac{(\sigma_s^2 - \sigma_z^2)}{2\sigma_z^2 \sigma_s^2} \times \left\{ \left(x + \frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2}\right)^2 - \left(\frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2}\right)^2 + \frac{m_z^2 \cdot \sigma_s^2 - m_s^2 \cdot \sigma_z^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right\}\right)$$

که R تعداد الکترون ناشی از نوفه خواندن و Δ بهره ای است که در بخش نوفه چندی سازی بدست آمد.

نوفه های دیگر

نوفه های دیگری نیز در سامانه وجود دارد که از آن جمله می توان به نوفه الگوی ثابت^{۱۸}، نوفه دمایی^{۱۹}، نوفه ریسیت^{۲۰} و نوفه ابیراهی لنز^{۲۱} اشاره نمود. البته این نوفه ها مقدار کم و در نتیجه اثر ناچیزی بر روی روشنایی ستاره در تصویر دارند و یا آنکه با کالیبراسیون می توان اثر آن ها را کاهش داد.

در واقع نوفه های خواندن، چندی سازی و ... به متغیرهای حسگر تصویربرداری بستگی دارد و با تقریب خوبی توزیع احتمال مجموع آن ها به صورت سیگنال گوسی است.

$$P_Z(z) \sim N(m_z, \sigma_z) \quad (13)$$

که با توجه به مدل ارایه شده در فوق و شکل ۱ تعداد الکترون پیکسل مرکزی تصویر ستاره از رابطه زیر بدست می آید.

$$NE = (u \times k \times v) \times w + z \quad (14)$$

آشکارساز بهینه

در بخش قبل متغیرهای تأثیرگذار بر میزان روشنایی پیکسلی که بیشترین مقدار را در تصویر یک ستاره دارد معرفی و مقدار و توزیع احتمال آن ها بدست آمد. در این قسمت هدف اصلی مقاله که طراحی آشکارساز بهینه به منظور متمایز نمودن پیکسل های مربوط به تصویر ستاره از نوفه (با توجه به مطالب بخش قبل) است، توضیح داده شده و روابط آن بدست آمده است. با توجه به آنکه تصویر ستاره بر روی چند پیکسل می افتد، ابتدا آشکارساز براساس پیکسلی از تصویر ستاره که بیشترین مقدار را دارد (پیکسل مرکزی) طراحی می شود سپس به سطح آستانه برای پیکسل های اطراف تعمیم داده می شود که با پیمایش بر روی پیکسل های حسگر تصویربرداری آن ها را آشکار می کند.

آشکارسازی پیکسل مرکزی

اگر در رابطه (۱۴) تغییر متغیر زیر صورت گیرد:

$$S = (u \times k \times v) \times w \quad (15)$$

مسأله آشکارسازی به صورت رابطه (۱۶) خواهد شد که در آن دو فرضیه^{۲۲} وجود دارد و وظیفه آشکارساز انتخاب بین آن دو به صورت مناسب است [۱۴].

18 Fixed Pattern Noise

19 Thermal Noise

20 Reset noise

21 Lens Aberration

22 Hypothesis

23 False Alarm
24 Neyman-Pearson

می‌شود که اگر پیکسل از مقدار معینی بیشتر باشد، متعلق به تصویر ستاره است.

با توجه به رابطه (۱۴) و اینکه متغیرهای تصادفی از یکدیگر مستقل هستند، میانگین و واریانس دو فرضیه H_1 و H_0 به صورت زیر است [۱۵]:

$$m_s = E[NE] = E[u] \times E[k] \times E[v] \times E[w] + E[z] \quad (۲۷)$$

که $E[\cdot]$ امید ریاضی است و واریانس سیگنال (مربع انحراف معیار) نیز به صورت زیر است.

$$\sigma_s^2 = Var[NE] = Var\{(u \times k \times v) \times w + z\} = Var\{(u \times k \times v) \times w\} + Var\{z\}$$

با توجه به اینکه

$$Var\{A\} = E\{A^2\} - (E\{A\})^2 \quad (۲۳)$$

داریم:

$$Var\{(u \times k \times v) \times w\} = E\{u^2\} \times E\{k^2\} \times E\{v^2\} \times E\{w^2\} - (E\{u\})^2 \times (E\{k\})^2 \times (E\{v\})^2 \times (E\{w\})^2 \quad (۳۰)$$

همچنین برای نوفه نیز خواهیم داشت:

$$m_z = E\{z\} = E\{z_1\} + E\{z_2\} + E\{z_3\} + E\{z_4\} \quad (۳۱)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_{z_1}^2 + \sigma_{z_2}^2 + \sigma_{z_3}^2 + \sigma_{z_4}^2}$$

بنابراین نحوه محاسبات و تعیین سطوح آستانه در حالت کلی بدین صورت است که باید ابتدا میانگین و انحراف معیارها طبق روابط (۲۷)-(۳۱) بدست آید. سپس احتمال هشدار اشتباه که برای الگوریتم‌های ردیاب ستاره قابل تحمل است انتخاب می‌گردد. این مقدار طبق رابطه (۱۸) باید برابر با انتگرال از تابع توزیع مربوطه در بازه‌ی رابطه (۲۱) باشد که طبق آن مقادیر سطح آستانه بدست خواهد آمد. با داشتن این مقادیر، P_D طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$P_D = \int_{(x: L(x) > \gamma)} P(x|H_1) dx \quad (۳۲)$$

در برخی از مقالات آمده است که ابتدا نوفه پس زمینه (میانگین نوفه سامانه) از تصویر کم شود و سپس سطح آستانه بر روی آن اعمال گردد. در صورتیکه طبق رابطه (۲۱) و دو بخشی بودن سطح آستانه این عمل در حالت کلی صحیح نمی‌باشد و با این کار بخشی از اطلاعات تصویر حذف می‌شود.

برای یافتن سطح آستانه از دو طرف رابطه لگاریتم طبیعی گرفته می‌شود که چون تابعی صعودی اکید است اشکالی ندارد:

$$\ln \frac{\sigma_z}{\sigma_s} + \frac{(\sigma_s^2 - \sigma_z^2)}{2 \sigma_z^2 \sigma_s^2} \times \left\{ \left(x + \frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right)^2 - \left(\frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right)^2 + \frac{m_z^2 \cdot \sigma_s^2 - m_s^2 \cdot \sigma_z^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right\} > \ln \gamma \quad (۲۰)$$

با توجه به بزرگتر بودن σ_s^2 نسبت به σ_z^2 :

$$\left(x + \frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right)^2 > \frac{2 \sigma_z^2 \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \left(\ln \gamma - \ln \frac{\sigma_z}{\sigma_s} \right) + \left(\frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right)^2 - \frac{m_z^2 \cdot \sigma_s^2 - m_s^2 \cdot \sigma_z^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2}$$

با تغییر متغیر زیر داریم:

$$\gamma' = \frac{2 \sigma_z^2 \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \left(\ln \gamma - \ln \frac{\sigma_z}{\sigma_s} \right) + \left(\frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right)^2 - \frac{m_z^2 \cdot \sigma_s^2 - m_s^2 \cdot \sigma_z^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \quad (۲۲)$$

و

$$\left| x + \frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2} \right| > \sqrt{\gamma'} \quad (۱۹)$$

اگر تغییر متغیر زیر را انجام دهیم:

$$\gamma'' = \sqrt{\gamma'} \quad (۲۰)$$

$$\alpha = \frac{m_s \cdot \sigma_z^2 - m_z \cdot \sigma_s^2}{\sigma_s^2 - \sigma_z^2}$$

محدوده x که در آن صورت پیکسل، مربوط به تصویر ستاره تشخیص داده می‌شود به صورت زیر است:

$$x > \gamma'' - \alpha, \quad x < -\gamma'' - \alpha \quad (۲۱)$$

بنابراین در حالت کلی محدوده وقوع رخداد H_1 دو بخشی است. یعنی اگر مقدار پیکسل از عدد $(\gamma'' - \alpha)$ بیشتر و یا آنکه از $(-\gamma'' - \alpha)$ کمتر باشد این پیکسل به عنوان پیکسل مرکزی ستاره تشخیص داده می‌شود. البته با توجه به اینکه x مقدار پیکسل و عددی مثبت است و طبق رابطه (۲۰) نیز γ'' مثبت است، در شرایطی که α عددی مثبت باشد و یا به عبارت دیگر

$$\frac{m_s}{m_z} > \frac{\sigma_s^2}{\sigma_z^2} \quad (۲۲)$$

محدوده $(x < -\gamma'' - \alpha)$ تهی خواهد بود. در نتیجه نحوه تشخیص پیکسل مرکزی به یک سطح آستانه معمولی تبدیل

$$\begin{aligned} \text{total number of photon} = & \\ (4 \times 10^6 \times 10^{-6.5}) \times (30 \times 10^{-3}) \times & \\ (\pi \cdot \frac{3^2}{4}) = 3377 & \quad (33) \end{aligned}$$

جدول ۸- مشخصات ردیاب ستاره

| واحد | مقدار | مشخصه |
|------------|-------|-----------------------------|
| سانتی متر | ۳ | قطر دهانه |
| میلی ثانیه | ۳۰ | زمان نورگیری |
| درصد | ۶۰ | ضریب عبوردهی اپتیکی |
| درصد | ۳۴ | ضریب تبدیل فوتون به الکترون |

بنابراین:

$$P_U(u) \sim N(3377, 58) \quad (34)$$

ضریب تبدیل فوتون به الکترون نیز حدود ۳۴٪ با انحراف معیار حدود ۱٪ (بدلیل نایکنواختی) است.

مشخصات نوفه‌های حسگر نیز به صورت زیر است:

✓ نوفه خواندن: دارای انحراف معیار ۴۰ الکترون و میانگین صفر است.

✓ نوفه جریان تاریک: متناسب با زمان نورگیری است که میانگین ۸۰ الکترون و انحراف معیار ۸/۹ دارد.

✓ نوفه چندی سازی: میانگین صفر و انحراف معیار آن به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{quantization}} = & \left(\frac{\text{ظرفیت اشباع}}{\text{تعداد بیت}} \right) / \sqrt{12} \\ = & \frac{41.5}{\sqrt{12}} = 12 \end{aligned} \quad (24)$$

✓ نوفه‌های دیگر نیز مجموعاً نوفه طبیعی با میانگین صفر و انحراف معیار ۲۰ الکترون می‌باشد.

طبق روابط (۲۷) تا (۳۱) میانگین و انحراف معیار سیگنال‌ها به صورت زیر خواهد بود.

(۳۶)

$$m_z = E\{z\} = E\{z_1\} + E\{z_2\} + E\{z_3\} + E\{z_4\} = 80$$

$$\sigma_z = \sqrt{40^2 + 8.9^2 + 12^2 + 20^2} = 47.2$$

(۳۷)

$$m_s = 3377 \times 0.6 \times 0.4350 \times 0.34 + 80 = 379.7$$

$$\sigma_s = \sqrt{\text{Var}\{(u \times k \times v) \times w\} + \text{Var}\{z\}} = 71.2$$

به منظور شبیه‌سازی و اثبات روابط بیان شده، ۱۰^۶ نمونه تصادفی طبق توابع توزیع احتمال بیان شده در بخش «الگوی روشنایی ستاره در تصویر» تولید و طبق رابطه (۱۴) ترکیب شدند. تابع

همانگونه که پیش از این نیز اشاره گردید، این روابط در طراحی الکترواپتیکی سامانه ردیاب ستاره نیز استفاده می‌شود. به عنوان مثال اگر بدلیل الگوریتم‌های شناسایی ستاره و افزایش دقت آن لازم باشد که ستاره‌ها با قدر کمتر از ۷ قابل رؤیت باشد. طبق روابط (۱) و (۲) می‌توان دهانه اپتیکی و یا زمان نورگیری را با توجه به محدودیت‌هایی که وجود دارد افزایش داد و محاسبات برای رسیدن به P_{FA} مورد نظر صورت گیرد.

تعمیم آشکارساز به پیکسل‌های مجاور

در قسمت قبل مسأله آشکارسازی و سطح آستانه بهینه برای پیکسل مرکزی (پیکسل با بیشترین مقدار) تصویر ستاره بدست آمد. ولی بهتر است از پیکسل‌های مجاور نیز استفاده شود [۱۶]. زیرا در برخی از مواقع مانند موارد زیر ممکن است پیکسلی به اشتباه ستاره تشخیص داده شود:

- شدت نوفه زیاد بوده و از سطح آستانه بیشتر باشد.

- سوخته شدن برخی از پیکسل‌های حسگر تصویربرداری

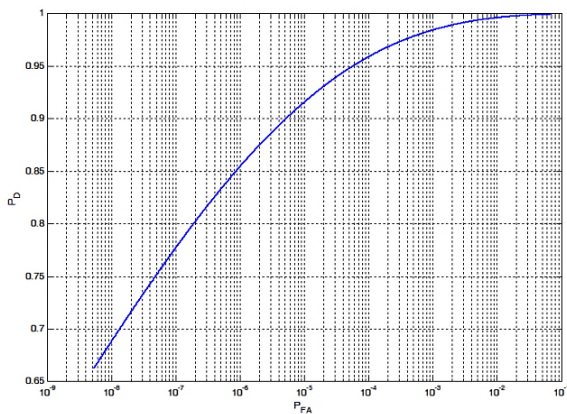
- وجود اسپایک‌های^{۲۵} نوری

در هر سه مورد فوق این اثر بر روی تک پیکسل است و به ندرت دو پیکسل مجاور این شرایط را دارند. بنابراین در این مقاله از این خصوصیت استفاده کرده و دو سطح آستانه تعریف می‌گردد. سطح آستانه اول مربوط به پیکسل مرکزی با بیشترین مقدار و سطح آستانه دوم مربوط به پیکسل‌های مجاور آن است. با توجه به شبیه‌سازی انجام شده، در بدترین حالت که مرکز ستاره بر روی مرز چهار پیکسل بیافتد (شکل ۲-ب) مقدار پیکسل مجاور ۳۹ درصد پیکسل مرکزی است. بنابراین سطح آستانه دوم را حدود ۰,۳۵ سطح آستانه اول که در قسمت قبل محاسبه شد، قرار می‌دهیم. روش کار بدین صورت است که اگر پیکسلی از سطح آستانه اول بیشتر بود و پیکسل مجاور آن نیز از سطح آستانه دوم بیشتر بود، به عنوان ستاره تشخیص داده می‌شود و در غیر اینصورت نوفه است.

شبیه سازی

در این بخش محاسبات مربوط به آشکارساز بهینه پیکسل‌های متعلق به ستاره از نوفه برای یک سامانه نمونه انجام می‌گیرد که مشخصات آن در جدول ۸ آمده است. فرض می‌شود که ردیاب ستاره لازم باشد ستاره با حداکثر قدر ۶ را ببیند، بنابراین مسأله آشکارسازی برای کم‌نورترین ستاره قابل رؤیت حل خواهد شد. با توجه به مشخصات ذکر شده در جدول، تعداد کل فوتون‌های رسیده طبق روابط (۱) و (۲) برابر است با:

انتخاب شود، مقدار سطح آستانه ۳۱۶ می‌گردید. در نتیجه طراح به اشتباه تصور می‌نمود که با این سطح آستانه به احتمال شناسایی حدود ۱۰۰ درصد دست یافته‌است، درحالی‌که با این مقدار از سطح آستانه، مقادیر واقعی احتمال شناسایی و هشدار اشتباه^{-۷} $P_{FA}=3 \times 10^{-7}$ و $P_D=81\%$ می‌باشد که تفاوت آشکاری با مقدار مورد نظر طراح دارد و ممکن است الگوریتم‌های شناسایی ستاره را با مشکل مواجه نماید. در حالی‌که با سطح آستانه بهینه بدست آمده در این مقاله می‌توان به احتمال شناسایی بالاتری دست یافت. در شکل ۶ نمودار P_{FA} بر حسب P_D به ازای سطح آستانه بهینه رسم شده است.

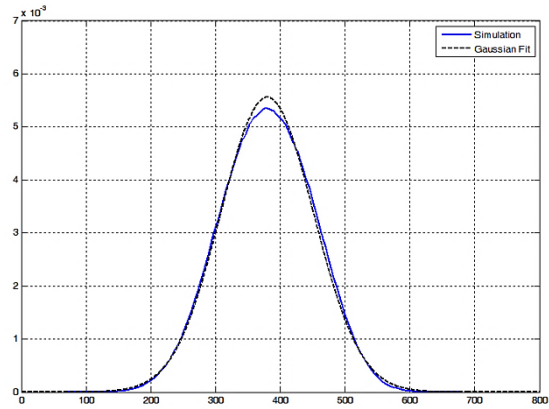


شکل ۶. نمودار P_{FA} بر حسب P_D

در واقع در شرایطی که نسبت سیگنال به نوفه زیاد باشد، منحنی‌های تابع توزیع سیگنال به همراه نوفه و تابع توزیع نوفه به تنهایی (دو نمودار شکل ۵) فاصله مناسبی دارند. بنابراین می‌توان از میانگین تابع توزیع نوفه به اندازه پنج برابر انحراف معیار آن فاصله گرفت و آن را به عنوان سطح آستانه در نظر گرفت. ولی در ساخت ردیاب ستاره برای ماهواره‌های کوچک محدودیت‌هایی وجود دارد که امکان تحقق سیگنال به نوفه بالا دشوار است. به همین دلیل لازم است تحلیلی صورت پذیرد و سطح آستانه مناسب (طبق روابطی که در این مقاله اثبات شد) بدست آید.

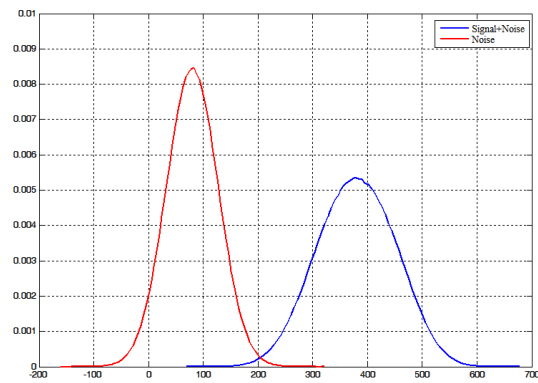
از دیگر مسایل مهمی که در مقالات توجه دقیقی به آن نشده است مسأله «نسبت فوتون جمع شده در پیکسل مرکزی» است. اگر در مثال فوق این متغیر در نظر گرفته نشود طبق روابط (۲۷) و (۲۸)، $\sigma_s=52/7$ و $m_s=768/9$ خواهد شد که با مقادیر واقعی در رابطه (۳۷) $\sigma_s=71/2$ و $m_s=379/7$ تفاوت آشکاری دارد. حال اگر ردیاب ستاره با این مقادیر (در نظر نگرفتن نسبت فوتون جمع شده در پیکسل مرکزی) طراحی شود، سطح آستانه برابر با میانگین باضافه پنج برابر انحراف معیار انتخاب می‌گردد و به اشتباه طراح تصور می‌نماید که به مقادیر $P_{FA}=6 \times 10^{-8}$ و $P_D=100\%$ دست یافته است. در این مقاله مشخص گردید که «نسبت فوتون جمع شده در پیکسل مرکزی» نقش بسزایی دارد و مقدار واقعی احتمال شناسایی و احتمال هشدار اشتباه آن $P_{FA}=3 \times 10^{-7}$

توزیع احتمال NE به صورت شکل زیر بدست می‌آید. همانگونه که در شکل مشخص است، تابع توزیع بدست آمده کاملاً شبیه توزیع گوسی است. با برازش دادن تابع گوسی، میانگین و واریانس آن به ترتیب ۳۸۰ و $71/8$ خواهد بود که به اعداد بدست آمده در رابطه (۳۷) بسیار نزدیک است و صحت شبیه‌سازی و روابط ریاضی را نشان می‌دهد.



شکل ۴. تابع توزیع احتمال سیگنال به همراه نوفه و برازش گوسی آن

در شکل زیر توزیع احتمال نوفه (رُخداد H_0) و سیگنال باضافه نوفه (رُخداد H_1) نشان داده شده است.



شکل ۵. تابع توزیع احتمال نوفه و سیگنال به همراه نوفه

در این مثال با توجه به اینکه رابطه (۳۲) برقرار است، محدوده تصمیم‌گیری یکطرفه با P_{FA} به صورت زیر خواهد بود.

$$P_{FA} = \int_{\beta}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} e^{-\frac{(x-m_z)^2}{2\sigma_z^2}} dx = \rho \quad (25)$$

که $\beta = \gamma'' - \alpha$ است. بنابراین به ازای ρ معین، مقدار سطح آستانه و احتمال شناسایی (P_D) بدست می‌آید.

به عنوان مثال در این ردیاب ستاره که مشخصات آن در جدول ۸ آمده است، اگر P_{FA} برابر با 10^{-5} مد نظر باشد، سطح آستانه بهینه مقدار ۲۸۱ و در نتیجه احتمال شناسایی ۹۲ درصد بدست خواهد آمد. اگر قرار بود طبق آنچه در برخی از مقالات بیان شده است، سطح آستانه مساوی با میانگین باضافه پنج برابر انحراف معیار

مقالات دیگر نیامده و یا به صورت کاملاً سطحی بیان شده است. به عنوان مثال در یک ردیاب ستاره (معرفی شده در بخش شبیه‌سازی) اگر سطح آستانه بدون در نظر گرفتن این متغیر بدست آید به اشتباه P_D حدود ۱۰۰ درصد بدست می‌آید در صورتیکه مقدار واقعی آن ۸۱ درصد می‌باشد و این امر موجب طراحی اشتباه ردیاب ستاره می‌گردد.

در ادامه چند نکته پیرامون آشکارساز بهینه آمده است.

- در آشکارساز بهینه، مقدار هر پیکسل دریافت و بر اساس آن تصمیم‌گیری می‌نماید.
- با توجه به بررسی دقیقی که صورت گرفته است، از این روابط برای طراحی الکترواپتیکی ردیاب ستاره می‌توان استفاده نمود. بدین صورت که برای دست یافتن به P_D و P_{FA} مورد نظر، می‌توان مشخصات ردیاب ستاره از جمله قطر دهانه اپتیکی را بدست آورد. همچنین نسبت سیگنال به نوفه به طور دقیق‌تری بدست می‌آید.
- می‌توان احتمال P_{FA} بزرگتری را انتخاب کرد و از سوی دیگر ستاره‌ها را با توجه به ستاره‌های همسایه و همچنین شکل کلی تصویر ستاره و تناظر آن با تابع توزیع بخش اپتیک مورد بررسی قرار داد. البته میزان P_{FA} ، باید با توجه به نوع الگوریتم مورد استفاده و مقاومت آن نسبت به نوفه انتخاب شود.

مرجع‌ها

- [1]B. Spratling and D. Mortari, "A Survey on Star Identification Algorithms," Algorithms, vol. 2, no.1, pp. 93-107, 2009.
- [2]K. Ho, "A survey of algorithms for star identification with low-cost star trackers," Acta Astronautica, 2011.
- [3]C.C. Liebe, "Accuracy performance of star trackers: A tutorial," IEEE Trans. Aerospace, Elect. Syst., 2002, 38, 587-599.
- [4]C.T.F. Kuhl, "Combined Earth-/Star Sensor for Attitude and Orbit Determination of Geostationary Satellites," Ph.D. Dissertation, Institute für Flugmechanik und Flugregelung, Universität Stuttgart, March 2005.
- [5]T. Dzamba, J. Enright, "Ground testing strategies for verifying the slew rate tolerance of star trackers." Sensors 14, no.3 : 3939-3964, 2014.
- [6]R. Kandiyil, "Attitude Determination Software for a Star Sensor," Master Thesis, Lulea University of Technology, 2009.
- [7]RONALD C. STONE, "A Comparison Of Digital Centering Algorithms," The Astronomical Journal, Vol.97, no. 4, 1989.
- [8]A. B. Katake, "Modeling, image processing and attitude estimation of high speed star sensors," Doctoral thesis, Texas A&M University, 2006.

$P_D=81\%$ می‌باشد. این امر مشخص می‌نماید که در صورت عدم در نظر گرفتن این مطلب، محاسبات تا چه میزان اشتباه خواهد بود و الگوریتم‌های بعدی را با مشکل رو به رو خواهد کرد.

نکته دیگری که باید ذکر نمود، مطالب ذکر شده مربوط به شرایطی است که ردیاب ستاره کالیبره شده باشد و اثرات اعوجاج‌های تصویر حذف شده باشد. این اشکال ممکن است مطرح شود که هنگام قرار گیری ردیاب ستاره در مدار، به مرور زمان کالیبراسیون سامانه از دست خواهد رفت که برای اصلاح این امر باید از روش‌های کالیبراسیون در مدار [۱۷] استفاده نمود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مدلی از بخش الکترواپتیکی ردیاب ستاره ارائه شد و اثر قدر ستاره، متغیرهای اپتیکی و حسگر تصویربرداری بر میزان روشنی پیکسل‌های مربوط به تصویر ستاره مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه آن‌ها متغیر تصادفی هستند، تابع توزیع احتمالی روشنی پیکسل مرکزی تصویر ستاره بدست آمد. سپس بر اساس قضیه نیم-پیرسون، آشکارساز بهینه جهت متمایز نمودن پیکسل‌های مربوط به تصویر ستاره از نوفه محاسبه گردید. بنابراین به منظور طراحی الکترواپتیکی ردیاب ستاره ابتدا P_{FA} قابل تحمل برای الگوریتم‌های ردیاب ستاره انتخاب می‌گردد. سپس طبق روابط بیان شده در این مقاله، سطح آستانه و در نتیجه P_D بدست آمد.

ولی در مقالات دیگر، طراحی الکترواپتیکی ردیاب ستاره و تعیین سطح آستانه به صورت دقیق مورد بررسی قرار نگرفته است. برخی از مقالات سطح آستانه را به صورت تجربی بدست می‌آورند که بستگی به شرایط تصویربرداری دارد و منحصر به ردیاب ستاره مورد آزمایش است و قابل تعمیم به نمونه‌های دیگر نمی‌باشد. بعضی دیگر از مقالات از همان تصویر گرفته شده استفاده می‌نمایند و میانگین باضافه پنج برابر نوفه را به عنوان سطح آستانه در نظر می‌گیرند. ولی این روش تنها در شرایطی تقریباً صحیح است که SNR بالا باشد. بنابراین برای ماهواره‌های کوچک (نانو و میکرو) که محدودیت‌های وزن و ابعاد و ... وجود دارد، SNR کم خواهد بود و این روش کارایی لازم را ندارد. به عنوان نمونه (مثال ارائه شده در بخش شبیه‌سازی) سطح آستانه بدست آمده توسط این روش منجر به P_D حدود ۸۱ درصد می‌شود ولی سطح آستانه‌ای که آشکارساز بهینه (روش ارائه شده در این مقاله) بدست آورد P_D برابر با ۹۲ درصد بود. سپس این مسأله تعمیم یافت و سطح آستانه دومی برای پیکسل‌های مجاور تعریف شد که اسپایک‌های نوری را فیلتر نمود.

متغیر مهم دیگری که اثر آن در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت «مکان قرارگیری مرکز تصویر ستاره در پیکسل» است. تأثیر این متغیر و روابط ریاضی آن در روش‌های پیکسل‌های تصویر ستاره، در

- [9]H.Zhang, J.Li, "The Effects of APS Star Tracker Detection Sensitivity," International Conference on Optical Instruments and Technology, 2008.
- [10]B. Richard, J. Burnell, The Handbook of Astronomical Image Processing, Willmann-Bell, 2005, Richmond.
- [11]A. E. McKinnon, K. Unsworth, I. M. Woodhead, "A model for measurement of noise in CCD digital-video cameras," Measurement Science and Technology 19, no.4 : 045207, 2008.
- [12]G.C. Holst, CCD Arrays Cameras and Displays, JCD Publishing, 1998, Bellingham Washington.
- [13]E. Friedman, J.L. Miller, Photonics Rules of thumb, McGraw-Hill, 2003, Bellingham Washington.
- [14]S.M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory, Prentice-Hall, 1998, New Jersey.
- [15]A. Papoulis, Probability Random Variables and Stochastic Processes, McGraw-Hill, 1991, United States of America.
- [16]W. Steyn, M. Jacobs, P. Oosthuizen, "A High Performance Star Sensor System for Full Attitude Determination on a Microsatellite," Annual AAS Guidance and Control Conference, 1997.
- [17]M.A. Samaan, T. Griffith, P. Singla and Junkins J.L., "Autonomous On-orbit Calibration of Star Trackers," Core Technologies For Space Systems Conference ,Colorado ,Nov. 2001.